

NATM 터널 굴착시 초기 내공변위와 최종 내공변위의 상관관계 연구

김범주^{1*}, 황영철²

A study on the relationship between initial and final convergence in NATM tunnels

Bum-Joo Kim, Young-Cheol Hwang

Abstract A tunnel behavior predicted in the investigation and design stage is often different from its actual behavior due to mainly the complexity of ground conditions. In a tunnel construction, therefore, it is necessary to ensure the stability of the tunnel by predicting the behaviors of the ground and the supports through observations and measurements, and modifying immediately excavation and reinforcing methods when necessary. To do so, it is important to be able to predict the final tunnel behavior based on the initial tunnel behavior as early as possible. In this study, the correlations were obtained between the initial and the final convergence by analyzing statistically the convergence measurement data, collected from two domestic road tunnels under construction using NATM. In order to estimate the unknown displacements, occurred during the period between the excavation and the first measurement, two methods were used - one is the method by means of regression analysis using a modified exponential function and the other the method by a simple linear regression analysis using the data measured within the distance from tunnel face equal to the tunnel diameter (D). Finally, the relationships were obtained between the initial and final convergence, including the non-measured displacements estimated from the two different methods, by performing linear regression analyses. The regression analysis results showed that there are clear linear relationships between the initial and final convergence and the difference between the two linear regression equations was not that large for when using the exponential function and the simple linear function to estimate the non-measured displacements.

Keywords: Tunnel, measurement, correlation, convergence, NATM, regression analysis

요 지 터널 건설시 조사 및 설계 단계에서 예측한 터널의 거동은 지반의 지질 구조 및 재료 특성의 복잡함 등으로 인해 실제 시공 중의 거동과 일치하지 않는 경우가 많다. 따라서 시공 중에는 관찰과 계측을 통하여 지반과 지보재의 거동을 확인하고 위험이 예상될 경우 신속히 굴착 방법 및 보강 방법 등을 변경하므로써 터널의 안정성을 확보해야 한다. 그리고 이러한 목적을 위해서는 가급적 굴착 초기 단계에서 터널의 변형 거동을 파악하고 이로부터 최종적인 변위를 예측하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 NATM 방식에 의해 시공 중인 국내 두 곳의 도로터널 현장에서 수집한 변위 계측 data를 분석하여 굴착 초기 측정 내공변위량과 최종 내공변위량과의 관계를 통계적으로 유도하였다. 이 때 굴착 후 계측 전 까지 미측정 내공변위량을 추정하기 위하여 기존의 근사함수식을 수정하여 회귀분석하는 방법과 본 연구에서 제안하는 막장거리 1D(터널직경)까지의 계측 data를 이용하여 현장에서 용이하게 적용할 수 있는 간단한 선형 회귀분석을 이용하는 방법을 적용하였다. 최종적으로, 계측 전 변위량을 포함한 굴착 초기 내공변위와 최종 내공변위와의 관계를 통계적 방법을 통해 선형관계식으로 근사적으로 표현할 수 있었으며, 이 때 계측 전 변위량 추정방법으로 지수함수를 이용한 경우와 선형 회귀분석을 이용한 경우에 대해서 결과의 차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

주요어: 터널, 계측, 상관관계, 내공변위, NATM, 회귀분석

1. 서 론

산업 발전에 따라 증가하는 교통수요 충족 및 사회간접자본의 확충을 위하여 도로의 신규 건설과 기존 도로

의 개선 공사가 활발하게 진행되고 있으며 이 과정에서 도로 선형의 직선화를 통한 교통효율향상 추구하고 터널 굴착기술의 발전 등으로 도로터널의 급속한 증가와 장대화가 이루어지고 있다(김정엽 등, 2007). 국내의 도로터널은 대부분 암반 내 터널로 NATM 방식에 의해 설계, 시공되고 있다. 그러한 터널의 시공 중 변형 거동은 암반의 비균질성, 비등방성, 조사 및 시험의 한계성, 모

¹정회원, 동국대학교 사회환경시스템공학과 조교수

²정회원, 삼지대학교 건설시스템공학과 조교수

*교신저자: 김범주 (bkim1@dongguk.edu)

벨링 및 이론의 단순성 등으로 인해 설계 단계에서 예측한 변형 거동과 현저한 차이를 보이는 경우가 많다. 따라서 체계적인 계측 실시 및 관리를 통하여 계측 결과를 즉시 시공에 반영하는 과정이 매우 중요하다. 특히 굴착에 따른 터널 내공변위의 계측은 시공의 안전성 등을 검토하기 위한 가장 중요한 요소가 되며 그러한 내공변위의 변화 관찰을 바탕으로 굴착 개시 후 가능한 조기에 터널의 최종 변위량을 예측하는 것은 최종적인 터널의 안정성을 판단하기 위한 훌륭한 척도가 된다고 할 수 있다.

터널의 굴착 중 변위 계측 data를 이용하여 최종 변위량을 예측하기 위한 방법으로서 크게 터널 변위 곡선을 시간과 거리에 따른 여러 함수로 근사하여 표현하거나, 과거의 시공 실적을 바탕으로 굴착 개시 후 초기 변위량과 최종 변위량에 대하여 통계적으로 산정된 관계를 통해 예측하는 방법이 있으며, 이러한 방법의 적용은 국내·외에서 여러 연구자에 의해 보고된 바 있다(김호영과 박의섭, 1993; 정한중 등, 1993; Junichi et al., 1987; Liu and Wang, 1986; Panet and Guenot, 1982). 그러나, 국내의 경우 도로터널과 도심 지하철에 대해서 근사함수를 이용하여 최종 변위를 예측한 사례는 있으나, 계측된 자료를 이용하여 굴착 초기 변위와 최종 변위간의 관계를 통계적으로 산정한 사례는 많지 않다(김범주, 1997).

본 연구에서는 국내 두 곳의 도로터널 현장으로부터 터널 굴착에 따른 내공변위 계측 data를 수집하고 이를 분석하여 기존의 근사함수를 이용하는 방법과 본 논문에서 새로 제안하는 간단한 방법을 사용하여 굴착 직후로부터 최초 계측 이전에 발생하는 내공변위량을 추정하고, 최종적으로 통계적 방법을 통하여 계측 전 변위량을 포함한 굴착 개시 후 초기 변위량과 최종 변위량과의 상관관계를 유도하였다.

2. 터널 최종 내공변위 예측 방법

터널 굴착시 측정된 초기 내공변위를 이용하여 최종 내공변위를 예측하는 방법에 관한 연구는 주로 내공변위 이론을 바탕으로 근사함수를 이용하는 방법과 계측 data에 대한 통계적 분석을 이용하는 방법으로 이루어져 왔다.

2.1 근사함수를 이용한 예측

그림 1은 터널 굴진에 따른 터널 내공변위의 일반적인 변화 경향을 나타낸 것으로, 근사함수를 이용한 방법은 이와 같은 내공변위의 변화곡선이 여러가지 형태의 함수로 모델화가 가능하다는 것을 전제로 실측된 내공변위를 특정 모델함수에 대해 회귀분석하므로써 최종변위를 예측하는 방법이다.

Panet and Guenot(1982)은 axi-symmetric FEM 해석을 통해 탄성암반에서 굴착면을 원점으로 한 경우 내공변위는 다음과 같은 지수함수식으로 표시될 수 있다고 하였다.

$$C = C_x (1 - \exp(-\frac{x}{X})) \quad (1)$$

여기서, C_x : 최종 내공변위(예, mm)

X : 굴착면의 영향거리에 관련된 상수

만약, 굴진속도가 일정하다면 식 (1)은 다음과 같이 시간에 대한 함수로 표시 할 수 있다.

$$C = C_x (1 - \exp(-\frac{t}{T})) \quad (2)$$

여기서, C_x : 최종 내공변위(예, mm)

T : 굴착면의 시간과 관련된 상수

Panet and Guenot(1982)의 연구결과 이후 여러 연구자들이 내공변위 계측결과에 대한 해석을 통해 암반의 탄성뿐 아니라 탄소성 또는 점탄성적인 변형거동 특성을 반영할 수 있는 모델함수들을 제안하였다(김호영과 박의섭, 1993; Junichi et al., 1987; Liu and Wang, 1986). 표 1에서 계수값들은 실측 내공변위를 근사함수에 대해 회귀분석하므로써 결정되는 값이다.

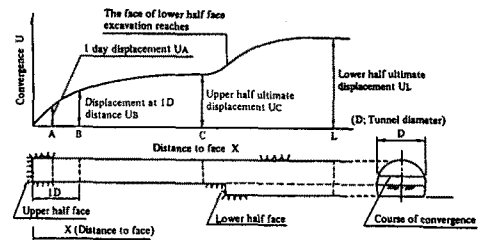


그림 1. 터널 굴진에 따른 내공변위의 변화(Junichi et al., 1987)

표 1. 터널 내공변위의 모델함수(김호영과 박의섭, 1993)

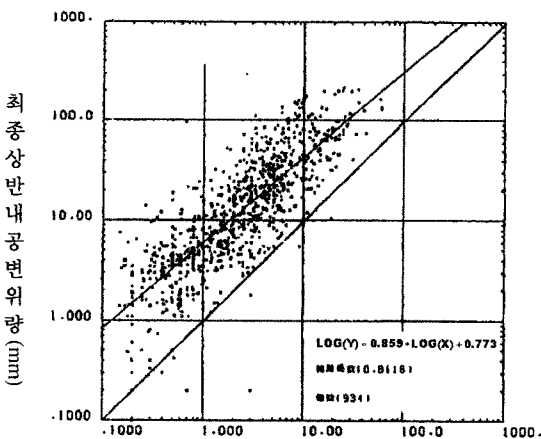
	모 델 함 수	계 수	지반 적용모델
1	$C(x)=a\{1-\exp(-bx)\}$ or, $C(t)=a\{1-\exp(-bt)\}$	a, b	탄 성
2	$C(t)=a \log(1+bt)$	a, b	점 소 성
3	$C(x)=C_x\{1-(X/(X+x))^2\}$	C_x, X	탄 소 성
4	$C(x, t)=a\{1-\exp(-bx)\}+c\{1-\exp(-dt)\}$	a, b, c, d	점 탄 성
5	$C(x, t)=C_x\{1-(X/(X+x))^2\}[1+m\{1-(T/(T+t))^{0.3}\}]$	C_x, X, T, m	시간의존적 변형을 고려한 탄소성

2.2 통계적 수법을 이용한 예측

이 방법은 이미 시공이 완료된 터널의 계측결과를 이용하여 각 계측지점에 대해 굴착 초기단계에서의 변위량(혹은 변위속도)과 최종 변위량의 크기를 비교하고 그 결과를 통계분석하여 상호간의 관계를 유도해내는 방법이다. 이러한 과정을 통해 최종적으로 얻어진 상관관계는 비슷한 조건의 시공 중 터널에 대해서 굴착 초기의 측정 변위량으로부터 개략적인 최종 변위량의 예측을 가능하게 한다. 또한, 시공 중인 터널에 대해서도 계측자료가 어느 정도 확보된 경우에는 계측결과와 경향을 파악하므로써 보다 현실적인 예측이 가능해진다.

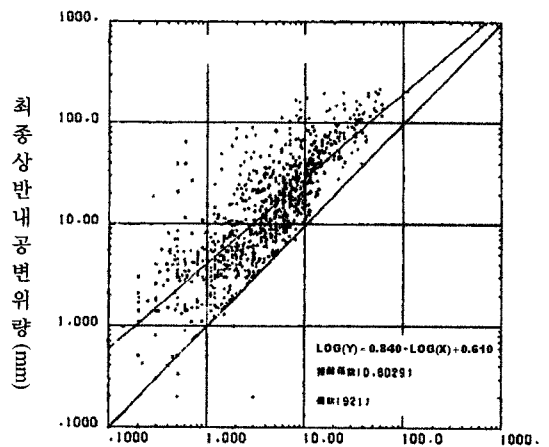
그림 2는 일본에서 과거의 터널 시공 실적을 집적한 결과를 기초로 하여 작성된 사례로서 시공 단계별 내공

변위량과 최종 내공변위량과의 관계를 전대수지상에 나타낸 것이다. 각 그림에 표시된 데이터의 수는 약 900여 개이며, 시공 단계 변위에 있어서는 초기 변위속도(즉, 계측개시 1일 후 변위진행속도)와 1D시 변위량(계측단면과 굴착거리가 터널 굴착폭(D) 상단에 이른 시점의 변위량)을 사용하고 있다. 이 그림을 사용하면 각 시공 단계 변위와 최종 변위를 대응시킴으로써 최종 변위량을 대략적으로 예측하는 것이 가능하다. 단, 그림의 실제 데이터는 통상의 2차선 단면 규모의 터널에 있어서 지보구조가 표준 지보패턴과 크게 다르지 않은 경우에 적용이 가능하고 초기 계측 시점이 현저하게 늦은 경우는 적용이 불가능한 것으로 알려져 있다(日本道路協會, 1983).



초기상반내공변위속도(mm/day)

(a) 초기 변위속도



1D시 상반내공변위량(mm)

(b) 상반 1D 굴착시

그림 2. 통계적 방법을 통한 굴착 초기 내공변위와 최종 내공변위의 관계(日本道路協會, 1983)

3. 적용 현장 계측 data 분석

3.1 현장 개요 및 계측 현황

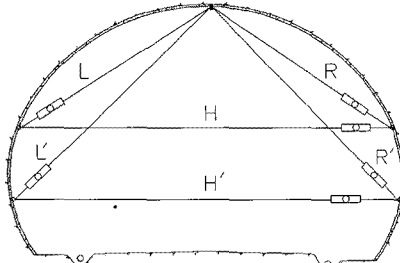
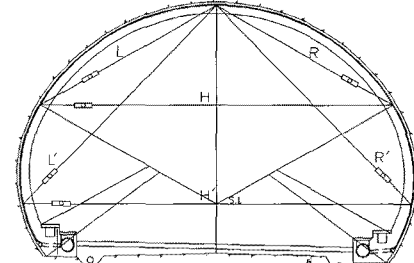
본 연구의 수행을 위해 NATM으로 시공 중인 국내 두 곳의 도로터널 현장에서 굴착에 따른 내공변위 측정 data를 수집하였다. 각 터널들에 대한 기본적 사항과 지반상태 및 계측단면 등은 표 2에 나타난 바와 같다. 두 터널의 굴착방식은 모두 상·하반 분할 굴착방식이었으며 계측자료 확보 당시 하반 굴착이 시작되지 않은 관계로 상반 굴착시의 계측자료만을 대상으로 분석을 수행하였다.

분석된 계측자료는 지점별로 A 터널의 경우 20개 지점(상행선 STA.2K+400~2K+880, 하행선 STA.2K+380~2K+830)이었으며, B 터널의 경우는 10개 지점(상행선 STA.1K+473.28~1K+613.28, 하행선 STA. 1K+480~1K+560)이었다. 각 지점에서 내공변위 측정은 상부 반단면에 대해서 각각 수평(H), 좌측(L) 및 우측(R)에 대

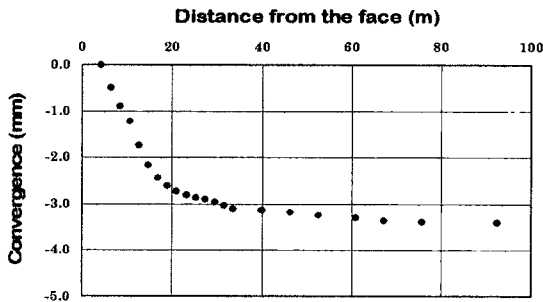
해서 실시되었으며 상반 굴착 완료 후 하반 굴착시 수평(H'), 좌측(L') 및 우측(R')에 대해서 실시될 예정이었다. 따라서, 분석에 사용된 자료는 각 지점별로 상부 반단면에 대하여 수평(H), 좌측(L) 및 우측(R)에 대한 내공변위 측정결과였다.

내공변위 계측은 굴착 후 시간의 경과에 따라 실시되었는데, 대부분 막장의 굴진속도가 일정하지 않았으므로 내공변위량 예측을 위한 모델함수의 설정에 있어 시간에 대한 함수보다는 막장거리에 따른 함수로 표현하는 것이 합리적이라고 판단하였다. 따라서, 전체 data에 대해서 시간 경과에 따라 계측된 변위량을 그림 3의 예에서 나타난 바와 같이 막장거리 증가에 따른 변위량으로 변환하는 작업을 수행하였다. 또한, 이를 통해 모든 지점에 대해 굴착 후 최초의 내공변위 측정이 막장진행이 어느 정도 진행된 후 이루어졌는지를 조사하였다. 그 결과 그림 4에 보는 바와 같이 A 터널의 경우 최초 계측

표 2. 현장 개요 및 계측 현황

터널분류		터널 A(서해안 고속도로)	터널 B(호남 고속도로)
터널 개요	공사 위치	(상행선) STA.2K+370~STA.3K+060 (하행선) STA.2K+360~STA.3K+060	(상행선) STA.1K+265.28~STA.1K+673.28 (하행선) STA.1K+272~STA.1K+680
	연장	(상행선) 690 m (하행선) 700 m	(상행선) 408 m (하행선) 408 m
	폭원	12.80 m	11.148 m
	높이	8.304 m	7.263 m
	공법	NATM	NATM
지반상태		터널구간의 지층은 상부로부터 표토, 붕적토, 잔류토, 풍화암, 연암 및 경암층의 순으로 분포하고 있으며 터널 통과지층인 경암층의 지질상태는 모암인 편마암이 풍화를 받지않은 신선한 상태임.	터널 시점부의 지층은 RQD 75%이상의 양호한 상태의 경암인 반면, 터널 중앙과 종점부 구간의 지층은 풍화암과 연암임. 풍화암의 경우 기반암이 심하게 풍화작용을 받았으나 아직 암의 성질을 많이 보유하고 있는 상태임.
내공변위 계측		상부 반단면에 대해서 각각 수평(H), 좌측(L), 및 우측(R)에 대해서 실시함. 상반굴착 완료 후 하반굴착시 수평(H'), 좌측(L'), 및 우측(R')에 대해서 실시될 예정임.	상부 반단면에 대해서 수평(H), 좌측(L), 및 우측(R)에 대해서 실시함. 상반굴착 완료 후 하반굴착시 수평(H'), 좌측(L'), 및 우측(R')에 대해서 실시될 예정임.
			

시점으로부터 막장거리가 2.0~3.0 m인 경우가 조사지점의 50%로 가장 많았으며 평균적으로 막장이 약 4.0 m정도 진행된 후에 초기변위가 측정된 것으로 나타났다. 그리고 B 터널의 경우는 최초 계측시까지의 평균 막장진행거리는 평균 7.8 m이었으며 1D(D: 터널직경) 이상 굴착이 진행된 후 계측이 시작된 지점도 3개 지점이나 되는 것으로 조사되었다.



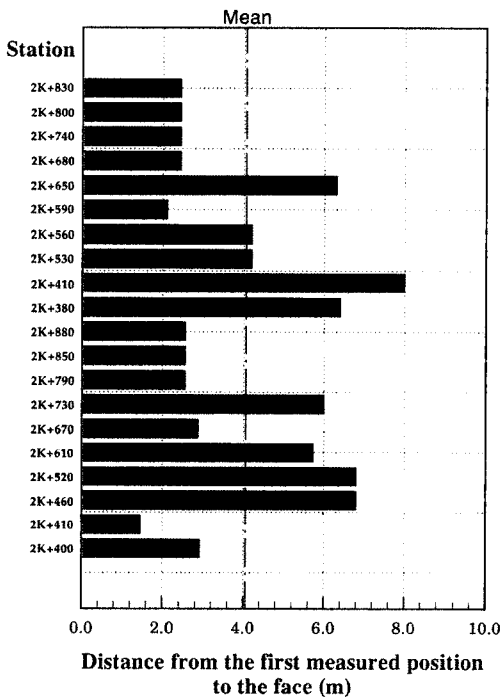
STA. 2K+530 H (Downtrain line)

그림 3. 막장거리 증가에 따른 내공변위량 변화 예(A터널 하행선 STA. 2K+530 수평측선 내공변위)

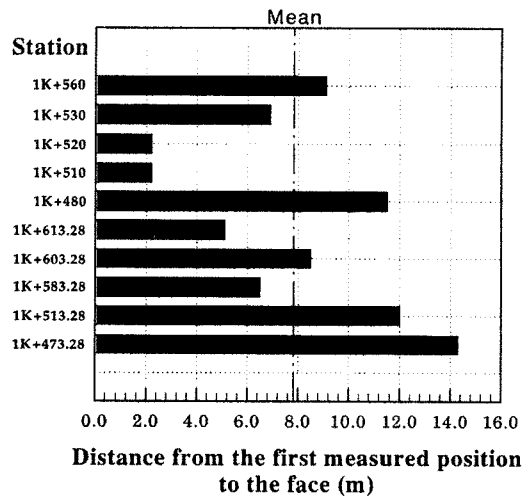
굴착에 따른 터널 변위의 변화를 가능한 정확히 파악하기 위해서는 굴착 이전 상태부터 굴착 직후 그리고 굴착의 진행에 따라 연속적이고 일률적인 계측이 필요하다. 그림 4를 통해 알 수 있듯이 대부분 굴착 후 최초의 계측이 굴착 진행 후 어느 정도 시간이 경과한 후에야 가능하였다. 또한 계측시점에서의 막장 진행거리도 일률적이지 못하고 지점마다 많은 차이가 있는 것으로 조사되어 초기 미측정 부분에 대한 변위의 예측과정이 터널의 최종변위를 파악하는 데 중요한 요소인 것으로 판단되었다.

3.2 계측 전 발생 변위량 추정

일반적으로 터널 내공변위는 굴착 직후 막장 근방에서 급격히 증대하는 경향이 있다. 그러나 앞서 본 연구 대상 현장의 계측결과에서와 같이 통상적으로 변위량 측정을 위한 계측은 굴착면으로부터 어느 정도의 거리가 떨어져서 어느 정도의 시간이 경과한 후에야 시작된다. 특히, 국내 시공여건상 터널 굴진시 별도의 계측기 설치시기가 주어지지 못하는 경우가 대부분이며 주·야



(a) A 터널



(b) B 터널

그림 4. 최초 계측지점으로부터 막장거리

간작업도중 록볼트 설치를 위한 천공시에만 내공변위 핀의 설치가 가능하므로 비교적 제대로 계측관리를 수행할 경우라도 막장면에서 설치위치까지의 거리는 대개 2~3 m로 알려져 있다(남순성, 1996). 따라서, 굴착 후 최초 변위 계측치는 굴착 후 계측 이전에 이미 발생한 변위를 포함하고 있지 않아 실제 터널의 초기 발생 변위보다 항상 작게 된다. 그러므로 측정된 결과만을 이용해 최종 변위량 예측을 실시한다는 것은 불합리하므로 전체적인 내공변위에 대한 분석을 하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

3.2.1 수정 근사함수를 이용한 계측 전 변위량 추정 내공변위 곡선은 여러가지 형태의 근사함수들로 표현

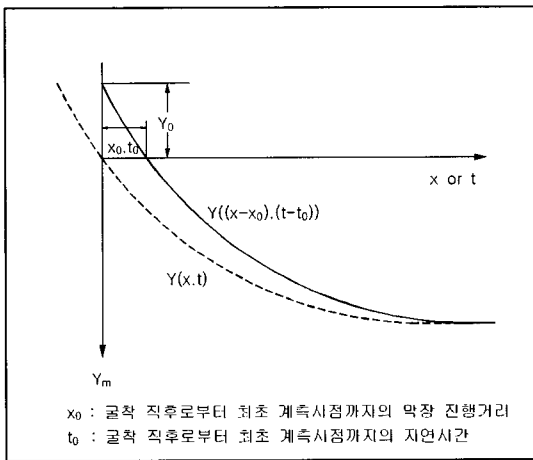


그림 5. 근사함수에 의한 계측 전 변위량의 추정

될 수 있으며 실제 측정된 내공변위를 근사함수에 대해 회귀분석하므로써 각 함수의 미지계수들을 결정 할 수 있다. 그러나 이 경우, 측정 전 내공변위가 고려되어야 하며 회귀분석 시 미지수가 되어 해석에 포함되어야 한다. 따라서 실제 측정된 내공변위를 Y_m 이라고 한다면 최초 계측시점 이전에 발생한 변위를 고려한 내공변위에 대한 근사함수는 다음과 같이 표현 할 수 있다(김호영과 박의섭, 1993).

$$Y_m = Y(x,t) - Y_0 \quad (3)$$

여기서, Y_m : 실제 측정된 내공변위(예, mm)

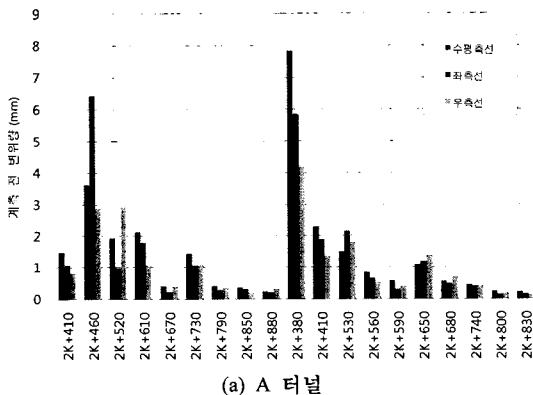
Y_0 : 측정 전 내공변위

x : 막장거리

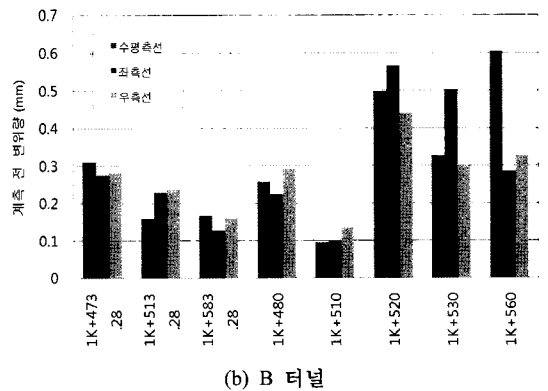
t : 막장거리 진행시까지의 시간

따라서, 굴착 직후로부터 최초 계측시점까지의 막장 진행거리(x_0) 및 지연시간(t_0)을 알고 있다면 그 동안의 발생변위 Y_0 값은 식 (3)의 x 와 t 를 각각 x_0, t_0 만큼 축이동시킨 함수식으로 변형하므로써 추정할 수 있다(그림 5).

본 연구에서는 막장거리에 따른 내공변위 data를 함수식에 의해 근사화시킴에 있어 계측 전 발생 변위를 추정할 수 있도록 기존의 근사함수식을 막장으로부터 최초 계측지점까지의 거리만큼 축이동시킨 근사함수식으로 수정하여 회귀분석을 수행하였다. 근사함수식으로는 지수함수식을 적용하였으며 그림 6은 굴착 초기 미계측 구간에서의 변위량을 수정된 지수함수식을 통해 추정한 결과이다. 지수함수 적용에 대한 보다 자세한 설명은 3.3절에 기술하였다.



(a) A 터널



(b) B 터널

그림 6. 수정 지수함수에 의한 계측 전 변위량 추정결과

3.2.2 선형 회귀분석을 이용한 계측 전 변위량 추정

터널 굴착으로 인한 내공변위는 대부분 굴착 초기에 급격한 변위가 발생하고 막장이 어느 정도 경과함에 따라 완만하게 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 이 방법은 내공변위와 막장거리의 관계에 있어서 굴착 직후부터 최초 계측시점까지의 내공변위 증가경향이 최초 계측시점부터 굴착 초기라 할 수 있는 막장거리 1D(D: 터널 직경)까지의 내공변위 증가경향과 일치한다고 가정하고, 막장거리 1D까지의 계측 data에 대해서 선형 회귀분석을 실시하여 그림 7과 같이 초기 미계측 구간에서의 변위량을 추정하는 방법이다. 본 방법은 근사함수에 의한 추정법과 비교하여 매우 간단하여 현장에서 신속히

적용할 수 있다는 장점이 있는 반면, 최초 계측시점까지 막장거리가 1D 이상인 경우 사용이 불가하거나 또는 1D 이내 측정 data수가 적은 경우 추정 결과의 신뢰도에 문제가 있을 수 있다는 단점이 존재한다.

그림 8은 막장거리 1D까지의 계측결과에 대해 선형 회귀분석을 실시하여 굴착 초기 미계측 구간에서의 변위량을 추정한 결과이다. 단, B 터널의 경우 STA.1K+473.28, 1K+513.28, 그리고 STA.1K+480에서 굴착 후 최초 내공변위의 계측이 막장이 1D(D: 터널직경) 이상 진행된 후 실시되었으며, STA.1K+603.28과 SAT.1K+560에서는 막장거리 1D 이내에 측정 data 수가 한 개였으므로 위의 방법을 적용할 수 없었다.

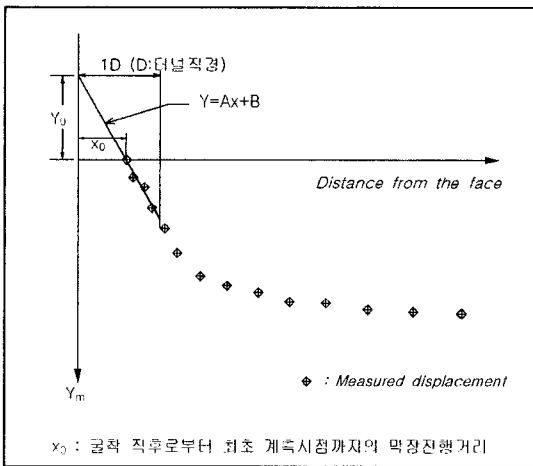


그림 7. 선형 회귀분석에 의한 계측 전 변위량의 추정

3.3 근사함수를 이용한 최종 내공변위 산정

터널 계측자료 조사지점의 지반 종류는 대부분 경암층이었으므로 탄성거동을 한다고 가정하고 Panet and Guenot(1982)에 따라 막장거리에 따른 실측 내공변위의 근사함수로서 지수함수를 적용하였다. 회귀분석식은 식 (4)와 같은 지수함수 형태를 기본식으로 하되, 3.2.1에서 기술한 바와 같이 굴착 직후부터 최초 계측시점까지의 발생변위를 고려하기 위하여 식 (4)를 미계측 구간(x0)만큼 x축으로 이동시킨 수정 지수함수식(식 (5))에 대하여 회귀분석을 실시하였다.

$$Y_m(x) = A(1 - \exp(-Bx)) \quad (4)$$

여기서, A, B : 계수

x : 막장진행거리

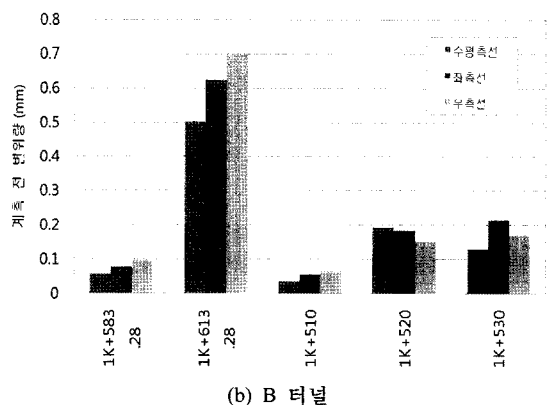
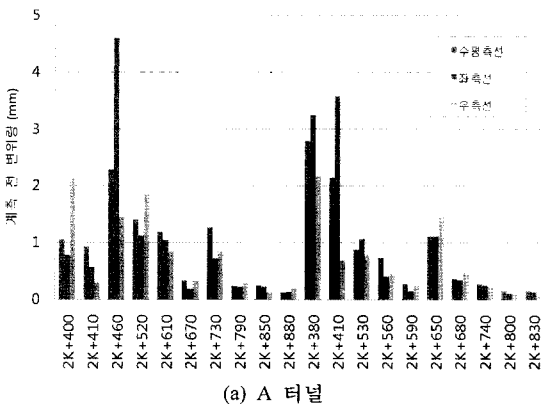


그림 8. 선형 회귀분석에 의한 계측 전 변위량 추정결과

$$Y_m(x) = A(1 - \exp(-B(x - x_0))) \quad (5)$$

여기서, x_0 : 막장으로부터 최초 계측지점까지의 거리

그림 9는 내공변위 측정결과에 대하여 위의 방법에 따라 지수함수로 회귀분석한 예이며 A 터널 20개 지점(60 측점), B 터널 10개 지점(30 측점)에 대해서 일부 지점을 제외하고 동일한 방법으로 회귀분석을 실시하였다. 회귀곡선식과 원 계측 data와의 오차는 평균 상대오차로 표시하였으며 다음과 같은 관계에 의해서 산정되었다.

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|(Y_m)_{mi} - (Y_m)_{yi}|}{(Y_m)_{mi}} \quad (6)$$

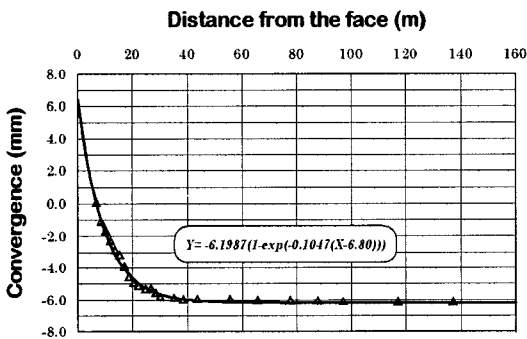
여기서, S : 평균상대오차

N : 총 data 수

$(Y_m)_{mi}$: 측정된 변위

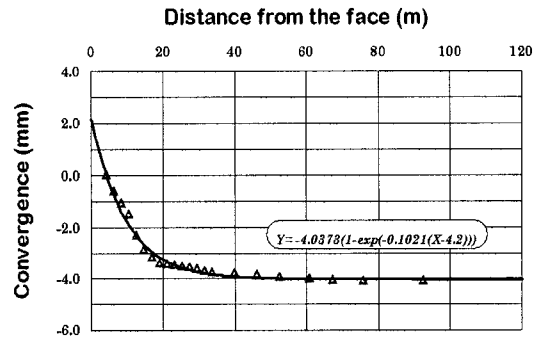
$(Y_m)_{yi}$: 계산된 변위

A 터널의 경우 시점부 1개 지점(STA.2K+400), B 터널의 경우 종점부 2개 지점(STA.1K+603.28 및 STA.1K+613.28)에 대해서는 계측자료의 불량으로 회귀분석을 실시하지 못하였는데, 특히 B 터널의 경우는 터널 종점부가 풍화암 구간으로 실측 내공변위의 형태가 지수함수로 근사화 될 수 없는 형태였다(그림 10 참조). 위의 지점들을 제외하고 A 터널 19개 지점(57 측점), B 터널 8개 지점(24 측점)에 대해 근사함수식과 원 계측결과의 평균 상



STA. 2K+460 L (Uptrain line)

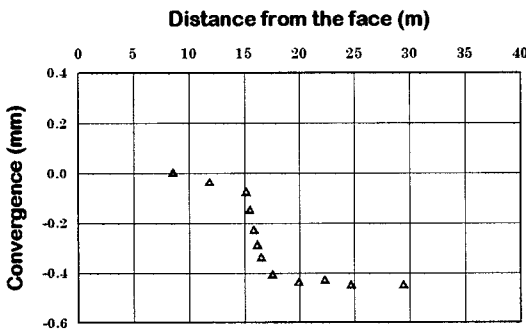
(a) 상행선 STA.2K+460 좌측선 내공변위



STA. 2K+530 L (Downtrain line)

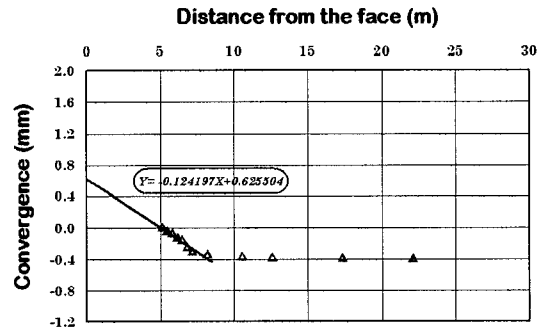
(b) 하행선 STA.2K+530 좌측선 내공변위

그림 9. 수정 지수함수에 의한 계측자료 회귀분석 예(A 터널)



STA. 1K+603.28 R (Uptrain line)

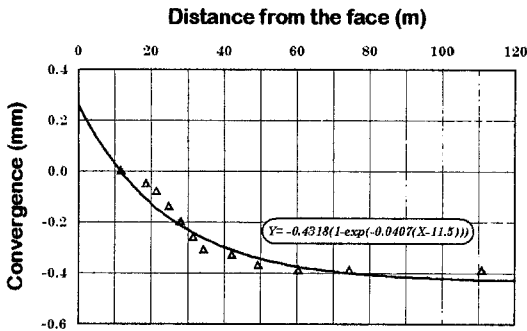
(a) 상행선 STA.1K+603.28 우측선 내공변위



STA. 1K+613.28 L (Uptrain line)

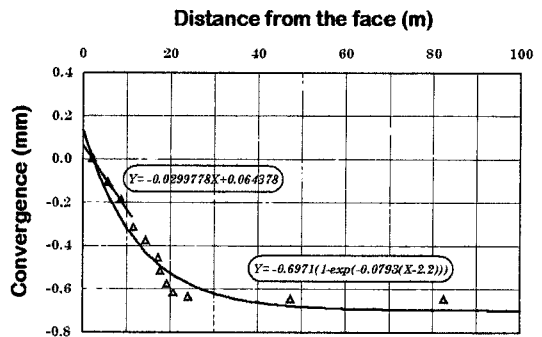
(b) 상행선 STA.1K+613.28 좌측선 내공변위

그림 10. B 터널의 종점부 풍화암 구간 2개 지점의 내공변위 계측 결과



STA. 1K+480 H (Downtrain line)

(a) 하행선 STA.1K+480 수평측선 내공변위



STA. 1K+510 R (Downtrain line)

(b) 하행선 STA.1K+510 우측선 내공변위

그림 11. B 터널의 중앙부 풍화암 구간 2개 지점의 내공변위 계측 결과

대오차들을 각각 평균한 결과, A 터널의 경우 5.86%, B 터널의 경우 13.74%인 것으로 나타났다. B 터널의 경우 전체 평균오차가 A 터널과 비교해 큰 이유는 그림 4에 나타난 바와 같이 B 터널의 경우는 A 터널에 비해 전체적으로 최초 계측시까지 막장이 많이 진행된 상태였으며, 또한 터널 중앙부 일부 지점의 풍화암 구간에서 내공변위 변화 경향이 경암 구간과 차이가 있고, 근사함수로서 지수함수의 적합도가 경암 구간에 비해 상대적으로 낮았기 때문인 것으로 판단되었다(그림 11 참조).

4. 상반 굴착초기 내공변위량과 상반 최종 내공변위량과의 상관관계

터널 상반에 대하여 굴착 초기인 막장거리 1D(D: 터널직경)인 시점의 내공변위량과 최종 내공변위량간의 상관관계를 유도하기 위하여 A 터널과 B 터널의 전체 계측자료 조사지점들에 대해서 상반 굴착 막장거리 1D 시 내공변위 data와 상반 최종 내공변위 data에 대한 선형 회귀분석을 실시하였다. 각 data에 포함되어야 할 계측 전 변위량은 두 가지 방법에 의해서 추정되었으므로 각 방법에 대하여 관계식을 유도하였다.

먼저, 지수함수에 의해 계측 전 변위량을 추정하고 막장거리 1D에서의 내공변위 data와 최종 내공변위 data를 선형 회귀분석한 결과 그림 12와 같이 나타났으며, 이 때 결정계수(coefficient of determination)값은 0.91로서 회귀식 대한 적합도는 비교적 높은 편이었다. 회귀

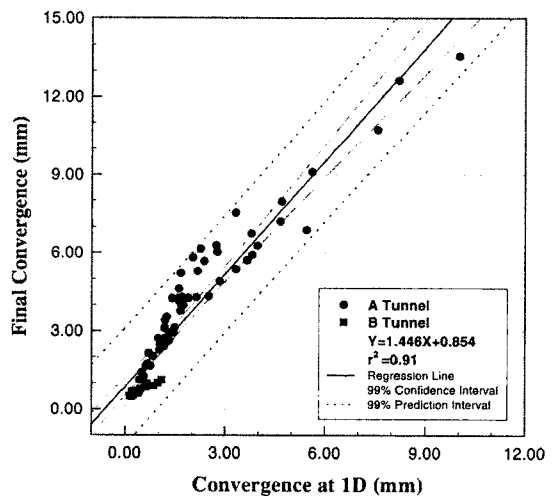


그림 12. 상반 굴착 1D시 내공변위량과 상반 최종 변위량과의 상관관계(지수함수에 의해 추정된 계측 전 변위량 포함)

분석 결과를 바탕으로 상반 막장거리 1D시 내공변위와 상반 최종 내공변위와의 관계를 표현하면 다음과 같다(그림 12 참조).

$$C_{\text{final}} = 1.45C_{1D} + 0.85 \quad (7)$$

여기서, C_{final} : 상반 최종 내공변위량(mm)

C_{1D} : 상반 막장거리 1D 때의 내공변위량(mm)

한편, 두 번째 방법인 막장거리 1D까지의 내공변위

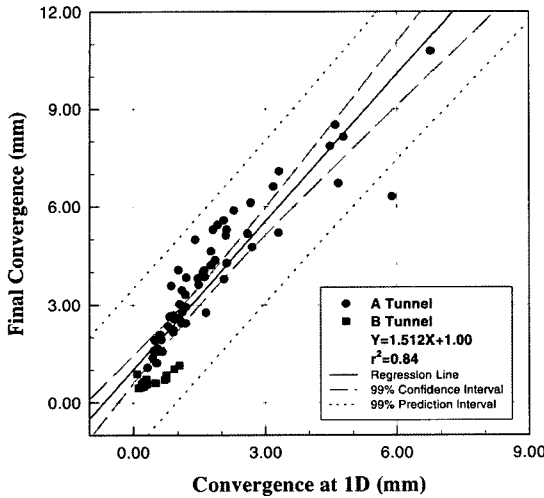


그림 13. 상반굴착 1D시 내공변위량과 상반 최종 변위량과의 상관관계(선형 회귀분석에 의해 추정된 계측 전 변위량 포함)

data에 대한 선형 회귀분석을 통해 계측 전 변위량을 추정하고 이를 포함한 상반 굴착 1D시 내공변위와 상반 최종 내공변위 data에 대해서 선형 회귀분석을 수행한 결과는 그림 13과 같다. 회귀식의 결정계수는 0.84로 지수함수를 적용한 경우보다 낮았으나 그 차이는 비교적 크지 않았다.

그림 13으로부터 회귀식을 통하여 상반 막장거리 1D 때의 내공변위량과 상반 최종 변위량과의 관계를 표현하면 다음과 같다.

$$C_{final} = 1.51C_{1D} + 1.00 \quad (8)$$

여기서, C_{final} : 상반 최종 내공변위량(mm)

C_{1D} : 상반 막장거리 1D 때의 내공변위량(mm)

5. 결 론

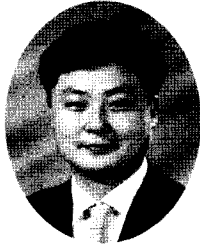
본 연구에서는 터널 제원 및 지반조건이 유사한 국내 두 곳의 도로터널 현장으로부터 내공변위 계측 data를 수집, 분석하여 계측 전에 발생한 미측정 변위량을 추정하고 이를 측정 변위에 포함하여 최종적으로 통계적인 방법을 통하여 상반 굴착 초기 내공변위와 상반 최종 내공변위간의 상관관계를 유도하였다.

1. 대상 터널에 대하여 기존의 시간 경과에 따른 내공변위 측정치를 막장거리에 따른 내공변위로 변환하여 조사한 결과, 전체 30개 조사 지점에 대하여 굴착 이후 최초 계측시 까지 막장 진행 거리는 최소 1.0 m에서 최대 13.0 m 까지로 지점마다 많은 차이가 있었으며, 따라서, 굴착 후 계측 전 발생 변위의 예측이 굴착 초기 변위와 최종 변위와의 관계를 파악하는데 중요한 요소인 것으로 판단되었다.
2. 지수함수에 의한 계측 전 변위량 추정시 계측이 지연되어 최초 계측위치로부터 막장과의 이격거리가 커질수록 지수함수의 특성상 계측 전 변위량을 과다하게 추정하는 경향이 있으므로 비교적 이격거리가 큰 경우에는 선형 회귀분석에 의한 방법이 보다 현실적인 것으로 판단되었다.
3. 총 90개 내공변위 측정 data에 대해서 막장거리에 따른 내공변위의 변화를 지수함수로 회귀분석한 결과 평균 상대오차가 10% 내외인 것으로 나타나 기존 내공변위 이론에서처럼 탄성 암반에서 막장거리 진행에 따른 내공변위 변화는 지수함수로 근사화 될 수 있음을 확인하였다.
4. 상반 굴착 초기인 막장거리 1D시 내공변위와 상반 최종 수렴변위와의 관계를 통계적으로 유도한 결과, 둘의 관계는 선형관계식을 통해 근사적으로 표현할 수 있었으며 이 때, 계측 전 변위량 추정 방법으로 지수함수를 이용한 경우와 선형 회귀분석을 이용한 경우 결과의 차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김범주 (1997), “통계적 방법에 의한 터널 최종변위량 예측에 관한 연구”, 석사학위논문, 한양대학교, 64p.
2. 김정엽, 신현준, 임광수 (2007), “국내 도로터널 안전관리 연구동향”, 한국터널공학회 2007 학술발표회 논문집, pp. 180-186.
3. 김호영, 박의섭 (1993), “터널 내공변위의 이론과 계측 결과의 분석”, 터널과 지하공간, 한국암반역학회, 제3권, 제1호, pp. 80-95.
4. 남순성 (1996), “암반특성에 따른 NATM터널의 시공중 거동에 관한 연구”, 박사학위논문, 한양대학교, 86p.
5. 정한중, 조경태, 김태영, 김용일 (1993), “도시 NATM터널에서 변위예측기술의 적용 사례연구”, 한국지반공학회 1993 봄학술발표회 논문집, pp. 27-31.

6. 日本道路協會 (1983), “道路トンネル觀察・計測指針”, pp. 125-132.
7. Junichi, S., Masayuki, O., Hiroyuki, I. and ToshihikoM (1987), Adaptibility of convergence forecasting method for controlling tunnel construction, 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Sakurai (ed.), Kobe, pp. 907-916.
8. Liu, H. and Wang, Z. (1986), Monitoring analysis of stability of caverns in weak rock, Proc. of the Int. Symp. on LRC, Helsinki, pp. 1319-1328.
9. Panet, M. and Guenot, A. (1982), Analysis of convergence behind the face of a tunnel, Tunneling 82, IMM, Brighton, pp. 197-204.



김 범 주

동국대학교
사회환경시스템공학과
조교수

E-mail: bkim1@dongguk.edu



황 영 철

상지대학교
건설시스템공학과
조교수

E-mail: ychwang@sangji.ac.kr
